物理学之美——解读2013诺贝尔物理奖

·张天蓉·

　　人人都追求美，物理学家也不例外，但到底什么是物理学的美，那是一个模

糊的概念，或者说只是一种感觉，只能意会，不能言传。物理学家也难以赋予它

科学而精确的定义。

1. 理论预言之美

　　狄拉克可算是物理学家中追美之第一人。他淡泊名利、少言寡语，却对其物

理理论之数学美极端追求，以至于在1963年《美国科学人》的一篇文章中，他写

出如此超凡脱俗的话：“使一个方程具有美感，比使它去符合实验更重要。”

　　狄拉克导出他著名的狄拉克方程后，为了追求他的理论的数学美，做到自圆

其说，而作出了一个被称为“狄拉克海”的美丽假设。在这个假设的模型中，狄

拉克天才地预言了当时并不存在，似乎显得有些荒谬的正电子【1】。

　　预言不存在的东西，犹如第一次吃螃蟹，是要有点冒险精神的。不过，狄拉

克别无选择，为了他的理论之美！

　　可没想到，在1932年，从美国加州理工学院传来一条令人吃惊的消息：卡尔

·戴维·安德森（Carl David Anderson）在研究宇宙射线的云室里，发现了一

种与狄拉克假设的“空穴”一模一样的新粒子——正电子！这是人类第一次发现

的反物质，这个实验为狄拉克赢得了1933年的诺贝尔物理奖。卡尔·戴维·安德

森之后也因此发现而得到了1936年的诺贝尔物理奖。

　　其实，科学史上的多次事实证明：成功的预言能够充分地体现美丽理论的强

大魅力。上世纪60年代中期，物理学家们，包括两位2013年诺贝尔物理奖得主，

即比利时理论物理学家弗朗索瓦·恩格勒和英国理论物理学家彼得·希格斯，以

及其他4位主要人物，从理论上预言存在一种希格斯玻色子。然后，他们孜孜以

求，期望等待着希格斯粒子登场，其目的也就是为了完善和证实粒子物理学中的

“标准模型”，证实物理理论之美。

2. 物理模型之美

　　物理，物理，究物之理，即探究物质起源之理，这是上天赋予物理学家的基

本使命。物质到底是由什么构成的？物质的结构是否可以无限可分下去？早在公

元前4世纪，古希腊学者德谟克利特就提出了物质由不可分的“原子”构成的观

念。后来，意大利科学家阿伏伽德罗提出分子学说；英国科学家道尔顿建立原子

模型。再后来，科学家又证明了原子是由质子、中子、电子组成的。除此之外，

人们还听说过光子、夸克、中微子等等，直到现在，被大多数物理学家认可的、

最好的粒子物理理论，则是标准模型【2】。

　　在标准模型中，物质的本源来自于4种基本力，以及61种粒子。尽管标准模

型还谈不上是一个“统一的物理理论”，因为它无法将那个顽固的“引力”统一

在它的框架中。但是，　它却较为成功地统一了其它三种力：电磁力、弱力、强

力，并且基本上能精确地解释与这三种力有关的所有实验事实。

　　标准模型认为的“基本粒子”有61种，其中包括36种夸克，12种轻子，8种

胶子，2种W粒子，另外还有Z粒子，光子，及希格斯粒子。

　　希格斯粒子是“标准模型”的宠儿，是被此模型所预言的所有基本粒子中，

最后一个被发现的粒子。2012年7月4日，欧洲核子中心（CERN）第一次宣布，他

们的大型强子对撞机（LHC）捕捉到类似希格斯玻色子的踪影。2013年3月14日，

欧洲核子研究组织发布新闻稿表示，先前探测到的新粒子被确认是希格斯玻色子。

即媒体所谓的“上帝粒子”。

　　物理学家为什么会预言存在这样一种希格斯粒子呢？这与一个叫做“自发对

称破缺”的物理术语有关。

3. 对称破缺之美

　　对称性不难理解，最简单的例子就是人体。人体基本上是左右对称的，有左

手又有右手，有左眼又有右眼。自然界还有许许多多对称的例子，对称是一种美。

各种各样的对称性，或许也应该加上各种不对称性，即对称的破缺，才构成了我

们周围这个美丽的世界。

　　物理学家也早就注意到事物的对称性。并且，他们所建立的物理规律，各种

方程，更是表现出对称的特点。也许从某种意义上可以说，物理学家们所追求和

探索的物质深层的种种对称性，就是他们所欣赏、且津津乐道的物理学之美。

　　然而，有一个如今看起来很简单的现象却曾经困惑物理学家多年。那就是说，

自然规律具有某种对称性，但服从这个规律的现实情形却不具有这种对称性。换

言之，在实验中却没有观察到这种对称性，这是怎么回事呢？现在看来，这并不

难理解，那是因为科学家们已经为我们理清了思路，建立了理论，这个理论就是：

自发对称破缺。

　　可以举出很多简单的例子来说明这个专业术语。比如说，一支铅笔竖立在桌

子上，它所受的力（物理定律）是四面八方都对称的，它往任何一个方向倒下的

几率都相等。但是，铅笔最终只会倒向一个方向。当它朝某个方向倒下之后，就

破坏了它原有的旋转对称性，而这种破坏是铅笔自身发生的，所以叫做自发对称

破缺。

　　再表达得更清楚一些，就是说，物理规律具有某种对称性，但是，它的方程

的某一个解却不一定要具有这种对称性。实际上，我们看到的世界中的一切现实

情况，都只是“自发对称破缺”后的某种特别情形。因此，它只能反映物理规律

的一小部分侧面。

　　自发对称破缺的概念，首先是在凝聚态物理中被朗道提出【3,4】、由安德

森发展，为了解释物质相变而用的。下面，我们举几个物理中对称破缺产生相变

的例子。

　　比如液态和固态，它们的对称性，到底孰高孰低呢？对称又如何破缺而导致

相变呢？首先想象一下在液态（水）中的情形：其中的水分子作着随机而无规的

布朗运动，没有固定的方向，没有固定的位置，液态的分子处于完全无序的状态，

处处均匀，在任何方向，任何点看起来都是一样的！而这正是我们所谓的对称性，

也就是说，液态的对称性很高。在固态（冰）中的情形就不一样了。水分子们不

再像在液体中看起来那样单调乏味，它们有次序地排列起来，形成整齐漂亮的格

子或图案。当你从晶格中望过去，不同方向会有不同的风景。也就是说，固态的

有序程度增加了，而对称性却降低了。

　　用数学的语言来描述的话，液态时，如果将空间坐标作任何平移变换，系统

的性质都不会改变，表明对空间的高度对称。而当水结成冰之后，系统只在沿着

某些空间方向，平移晶格常数a的整数倍的时候，才能保持不变。所以，物质从

液态到固态，对称性减少了，破缺了。从连续的平移对称性减少成了离散的平移

对称性。也就是说，晶体是液体的任意平移对称性破缺的产物。

　　另一个例子，是顺磁体到铁磁体的转变。在居里温度以上，磁体的磁性随着

磁场的有无而有无，即表现为顺磁性。外磁场消失后，顺磁体恢复到各向同性，

是没有磁性的，因而，与刚才所说的铅笔类似，具有旋转对称性。当温度从居里

点降低，磁体成为铁磁体而有可能恢复磁性。这时铁磁体会随机地选择某一个特

定的方向为最后磁化的方向，成为在这个方向磁化的永磁体（和铅笔朝一个方向

倒下的情况类似）。

　　如果我们想象，磁化磁体的分子中诞生了某种小生命。更进一步，不妨设想

我们就处在那种小生命的地位。那么，在我们看来，世界并不是旋转对称的，在

某个方向（磁化的方向）比较特别一些，能感觉到磁性！这儿可以用上一句中国

成语：“旁观者清，当局者迷。”

　　想想看，如果我们是从像磁铁那样一个有偏见的世界中来探索物理规律的话，

我们得用多长的时间，才能认识到真正的大自然是旋转对称的啊。也就是说，自

然定律的对称性一定要比我们能接触到的世界的对称性多得多。

　　事实上，我们能看到的真实世界的确是多次自发对称破缺后的结果，其中包

括大爆炸、星团形成、生命诞生……等等。

　　后来，自发对称破缺的思想被嫁接到粒子物理，再应用到了标准模型中，在

那儿大显身手。

4. 统一场论之美

　　标准模型建立在量子场论的基础上，量子场论的基本思想之一是认为：最基

本的物理实在是一系列充满空间的场，而每一种粒子对应于一种场。

　　四种基本作用力：电磁力、弱力、强力和引力，则是由于与其相对应的粒子

的交换而产生和传递的。比如说众所周知的，电磁力是由光子所激发和传递。

　　自发对称破缺也会被激发和传递。我们用一个通俗的例子来说明这点。

　　想象一大排竖立着的多米诺骨牌。每个骨牌面对着的情况类似于刚才所举的

竖立的铅笔。不过骨牌遵循的规律是左右对称，不像铅笔是旋转对称。

　　一个骨牌的物理规律是左右对称的，但倒下后的位置（向左或向右）就不对

称了。并且，只要有一个骨牌随机倒下了，对称性自发破缺了，便会诱发邻近的、

再邻近的……以至于很远的骨牌一个一个倒下。换言之，这种“激发”效应像一

种波动一样，可以被传递到很远的地方。

　　“一种激发的波动”,听起来有点像我们所说的电磁场中的光子。的确如此,

物理微观世界中力的作用也可以被想象成是这样传播的。

　　再回到骨牌的例子。如果骨牌做得比较薄,倒下去很快,它的作用传播起来也

很快,很快地就传到很远的地方,像光子那样。那时我们说,传播的力是一种远距

作用,传播粒子的静止质量为0。而如果骨牌比较厚,倒下去时是笨笨地慢动作。

那时候,骨牌效应传播不远就被衰减而传不下去了。这种情形就对应于某种短程力,

相应的传播粒子则具有一个有限的静止质量。

　　这些概念：对称自发破缺、元激发等等，被粒子物理学家从凝聚态物理搬来

研究基本粒子和场。这些粒子和场与我们刚才所举的现实生活中的铅笔和骨牌一

样，也遵循某种对称性。不过，它们遵循的是比我们常见的对称例子更为复杂的

对称性，被称之为规范对称性。

　　在上世纪60年代初，物理学家在运用自发对称破缺理论来研究弱力、强力和

电磁力统一理论的时候，碰到了一些麻烦，甚至一度似乎陷入绝境。事情是这样

的：一个统一这几种力的理论应该是规范对称的，否则就会导致发散而得出不合

理的荒谬结果。而规范对称的方程得出来的传递粒子只能是质量为0的粒子，这

也意味着被传递的作用力是长程力。这个结论对电磁力没问题，但并不符合弱力

和强力的情况。弱力和强力只在极短的距离起作用，在很短的空间和时间内就衰

减了，因此，传递粒子应该具有较大的质量。

　　困难还不仅仅如此，不但作用力的传递波色子没有质量，其它组成真实世界

的费米子，诸如电子、质子等，也都没有质量。这听起来像是个杞人忧天的故事：

“我们的世界明明是具有质量的，真不懂你们物理学家在说些什么？”别着急，

这当然只是说粒子物理学家们研究了几十年的规范理论走入了困境。因为根据这

个理论模型，得出了一个没有质量、与实际情况不相符合的世界。

　　物理学家们不愿意放弃看起来颇有希望的规范理论，而又要使某些基本粒子

得到质量，为此想了许多办法。其中，希格斯机制是最简单的一种方法。这种机

制在1964年被3个研究小组几乎同时提出，其中包括两位2013年诺贝尔物理奖得

主，共6位主要人物【5,6,7】，至于为什么以希格斯而命名，这其中有巧合或误

会，但并不重要，重要的是希格斯机制将规范场论带出了困境。希格斯机制的基

本思想是假设宇宙中存在一种无处不在的希格斯场，当它与其它规范粒子相作用

的时候，因希格斯场的真空态不为0而产生自发对称破缺，使规范粒子获得质量，

同时产生出一个带有质量的希格斯玻色子。

　　希格斯机制的实质，有点像是将规范理论中所有的粒子都得不到质量这个困

难，转移到一个统一的希格斯场的真空态上来统一解决。无论如何，它成功地解

释了粒子惯性质量的来源。

　　1968年，温伯格和萨拉姆率先将希格斯机制引入格拉肖的弱电理论，用于统

一弱力和电磁力的工作。他们三人因此而获得了1979年的诺贝尔物理奖。

　　包括希格斯机制的弱电统一理论，还预言了弱力的传递粒子W和Z粒子，它们

都是通过希格斯机制得到质量。这两个W粒子和1个Z粒子于1983年在CERN被发现。

　　希格斯粒子本来是人为引入标准模型的，它的发现【8】证实了标准模型基

本正确，也让我们再一次见识了物理学理论之美。

　　将四种作用力，以及构成世界的所有基本粒子，统一到一个单一的理论框架

中，一直是物理学家们追求的美梦。就连伟大的爱因斯坦，也抵挡不住统一场论

之美的诱惑，把他后半生几十年的精力献给了这一事业。

　　相信希格斯粒子的发现、标准模型的验证、近代弦论的发展，让我们离统一

场论之美景更近了一步。

参考文献：

【1】Dirac, P. A. M. (1928). "The Quantum Theory of the Electron".

Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and

Engineering Sciences 117 (778): 610.

【2】R. Oerter (2006). The Theory of Almost Everything: The Standard

Model, the Unsung Triumph of Modern Physics (Kindle ed.).

【3】Collected Papers of L D Landau, Ed. D ter Haar, NY, 1965 (Reprint

of Landau’s papers)

【4】于禄，郝柏林。《相变和临界现象》，科学出版社，1992

【5】Englert, Franc�0�5ois; Brout, Robert (1964). "Broken Symmetry and

the Mass of Gauge Vector Mesons". Physical Review Letters 13 (9): 321

–23.

【6】Higgs, Peter (1964). "Broken Symmetries and the Masses of Gauge

Bosons". Physical Review Letters 13 (16): 508–509..

【7】Guralnik, Gerald; Hagen, C. R.; Kibble, T. W. B. (1964). "Global

Conservation Laws and Massless Particles". Physical Review Letters 13

(20): 585–587.

【8】"Higgs Boson Discovery Confirmed After Physicists Review Large

Hadron Collider Data at CERN". Huffington Post. 14 March 2013.

Retrieved 14 March 2013.